

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ АГРОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОМПОСТА, ОБОГАЩЕННОГО ОСАДКОМ СТОЧНЫХ ВОД

*И.В. Ельшаева, к.с.-х.н., О.Г. Огнев, д.т.н.,
Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,
Петербургское шоссе, д. 2, Пушкин, Санкт-Петербург, 196601, Россия
elshaevaiv@mail.ru, ognew.og@mail.ru*

Для сохранения экологической устойчивости антропогенно преобразованных ландшафтов необходимо в первую очередь обратить внимание на здоровье и плодородие почв, подверженных интенсивным техногенным нагрузкам. Приоритетом здесь должны стать системы использования органических удобрений или удобрений из органического сырья. В настоящей работе исследовано влияние компоста на основе осадка сточных вод (ОСВ) муниципальных очистных сооружений на агрохимическую характеристику дерново-подзолистой почвы. В многолетнем полевом опыте увеличилось содержание органического вещества и доступного фосфора в почве, при общем увеличении емкости катионного обмена. Данные, полученные в полевом опыте, позволили создать математическую модель, прогнозирующую содержание органического вещества, питательных элементов и окислительно-восстановительные свойства почвы после однократного внесения компоста, обогащенного осадками сточных вод. Корреляционный анализ эмпирических и прогнозируемых результатов показал тесную прямую зависимость между внесением в почву органического материала и изменением суммы поглощенных катионов. Уравнение регрессии ($Y = -0,20483X_1 + 1,248738X_2$) с достаточно высоким уровнем достоверности (не менее 0,95) позволяет количественно оценить степень влияния органических отходов на изменение суммы обменных оснований смоделированного объекта.

Ключевые слова: осадок сточных вод, агрохимические показатели почвы, имитационная модель, регрессионный анализ.

Для цитирования: Ельшаева И.В., Огнев О.Г. Имитационная модель прогнозирования изменения агрохимических характеристик почв при использовании компоста, обогащенного осадками сточных вод// Плодородие. – 2025. – №5. – С. 76-80. DOI: 10.25680/S19948603.2025.146.14.

Имитационное моделирование – удобный инструмент описания вероятностных закономерностей в биологических, агроэкономических, технических системах. Его можно использовать, когда предмет исследования функционирует в соответствии с тем или иным вероятностным законом. Закон функционирования определяется из предыстории моделирования.

Прогнозировать можно любой вероятностный процесс. Основные работы по имитационному моделированию в АПК посвящены прогнозированию экономических процессов, таких как управление развитием сельскохозяйственного производства в регионе [6], тенденции изменения внутренних рынков и поведение объектов АПК в различных условиях [8]. В животноводстве имитационные модели помогают проследить динамику численности молочных стад – возможностей их естественного восстановления [3].

Практика имитационного моделирования и в агроэкологии имеет богатый опыт [9]. Например, при прогнозировании деградации пастбищных почв [7], оценке качества очистки сточных вод сельскохозяйственных предприятий [1], описании процессов выноса радионуклидов из почв [2]. Все вышеизложенное позволяет с уверенностью применять методы имитационного моделирования для прогнозирования изменения свойств почв при использовании различных органических удобрений.

Цель исследований – создание математической модели, прогнозирующей изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы при возможном однократном внесении в нее компоста, содержащего осадок сточных вод.

Методика. Объектом исследований послужил компост, приготовленный из кислого верхового торфа и

коммунальных отходов (осадка сточных вод) в соотношении 1:0,25, который был использован в качестве органического удобрения в полевом мелкоделяночном опыте. Компост содержал 75 % органического вещества, 2,5 фосфора и 2,2% калия в пересчете на сухое вещество, обладал нейтральной реакцией среды. Он был приготовлен в соответствии с техническими условиями ТУ 39.0–007–50872745–2019 [11]. Содержание тяжелых металлов в компосте не превышало нормативов, установленных ГОСТом Р 54651-2011. Органический компост вносили при закладке опыта в дозах 20 и 40 т/га.

Полевой опыт был заложен в трехкратной повторности на дерново-слабоподзолистой среднесуглинистой глеевой на моренном суглинке почве. Агрохимическая характеристика почвы: среднее содержание гумуса, обменная кислотность характеризуется как слабокислая. Почва высоко обеспечена подвижными соединениями фосфора и калия. Опыт продолжался три года, опытными культурами являлись бобово-злаковые, злаковые культуры: вико-овсянная смесь (2021 г. опыта), райграсс пастбищный (2022-2023 г. опыта). Почвенные пробы отбирали в конце опыта после уборки культуры. Для составления эмпирической базы моделирования проведено два независимых определения агрохимических свойств почв опытных делянок. Аналитические исследования были проведены по общепринятым в агрохимии методикам.

Фактические данные агрохимических исследований почвы использовали для построения имитационной модели влияния компоста обогащенного ОСВ на свойства дерново-слабоподзолистой среднесуглинистой глееватой почвы паркового хозяйства «Александровский парк» ГМЗ «Царское село». В ходе работы была исследована часть Александровского парка с наибольшей

рекреационной нагрузкой. Для проведения агрохимического обследования выделили шесть элементарных участков. В почвенных пробах определены: обменная и гидролитическая кислотность, содержание органического вещества и основных элементов питания, сумма обменных оснований. Моделированию подвергали все основные, наиболее характерные, свойства почвы, как исходного объекта. При этом стремились к разумному оптимуму: с одной стороны, широкий охват в моделировании всех (максимально возможных и разносторонних) свойств исходного объекта позволяет повысить достоверность получаемой модели, с другой стороны, усложняются как сам процесс моделирования, так и дальнейшая обработка полученной модели. Применяли дискретно-событийный метод моделирования, когда оценивают (исследуют) только основные события (этапы «жизни» модели), а не процесс их становления (перехода между этапами).

Далее результаты имитационного моделирования оценивали на их достоверность методами статистической оценки, а именно устанавливали количественные значения зависимости/независимости данных (степень случайности различия выборок). Дальнейшей обработке подвергали только результаты моделирования, показавшие уровень достоверности не ниже установленного значения.

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась по общепринятой методике средствами MS Excel с использованием встроенных пакетов обработки данных (надстройка «Анализ данных»): «Корреляция», «Описательная статистика», «Регрессия». Вероятность независимости непарных данных оценивали (для двухсторонних независимых выборок) пакетами корреляционного анализа с применением

критериев Стьюдента и Манна-Уитни. Во всех случаях, за нижний порог достоверности принималось значение не менее 0,95.

Результаты и их обсуждение. Результаты полевого опыта, проведенного в 2021-2023 г. на опытном поле СПбГАУ, показали, что внесение компоста, обогащенного ОСВ, оказало положительное влияние на агрохимические свойства почвы (табл. 1). Достоверно увеличилось содержание органического вещества, причем концентрация органического углерода в почве зависела не только от дозы внесенных органических удобрений, но и от урожайности злаково-бобовых и многолетних злаковых трав в годы проведения опыта и привнесения дополнительного органического вещества в виде корневых и пожнивных остатков. Это подтверждает достоверная положительная корреляционная связь между содержанием органического вещества и урожайностью викоовсяной смеси ($R=0,76$) и райграса ($R=0,70$) [4]. Положительное изменение запаса доступных фосфатов в почве также может быть связано как с внесением органических отходов, содержащих большое количество фосфора в доступной форме, так и с изменением интенсивности процессов десорбции фосфатов в системе почва-удобрение. При взаимодействии твердой фазы почвы с катионами растворимых солей, образующихся в результате минерализации органических веществ компоста, произошло изменение состава почвенного поглощающего комплекса в сторону насыщенности основаниями. Вместе с тем, дозы органического удобрения оказали неоднородное влияние на количество прочносвязанных ионов водорода и обменных катионов почвы. При увеличении дозы торфо-осадкового компоста в 2 раза заметна тенденция к росту гидролитической кислотности при общем увеличении емкости катионного обмена.

1. Агрохимическая характеристика почв опытных делянок

Вариант	C, %	pH _{KCl}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Hг	S
			мг/кг		смоль(экв)/кг	
			X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
1. Контроль	4,73±1,14	5,17±0,10	314,3±36,00	471,35±45,01	2,94±0,36	11,20±0,12
2. Компост ОСВ 20 т/га	8,19±1,47	5,26±0,27	803,3±35,12	512,42±20,16	2,86±0,22	14,20±2,60
$\Delta\bar{X}_{i,20}$	0,1123	-0,0085	17,0	-0,35	0,006	0,078
3. Компост ОСВ 40 т/га	7,81±1,73	5,04±0,03	783,3±51,32	495,53±88,86	3,34±0,37	12,13±0,50
$\Delta\bar{X}_{i,40}$	0,0489	-0,0105	8,6	-0,9375	0,009	-0,011

Полученные в полевом опыте данные позволили построить математическую имитационную модель влияния компоста, обогащенного ОСВ, на агрохимические показатели почв. На этапе предобработки данных был применен однофакторный дисперсионный анализ. Проверка гипотезы о равенстве средних характеристик показала, что до и после внесения различных доз компоста, обогащенного ОСВ, имеются достоверные различия.

Для построения модели было рассчитано среднее изменение каждого показателя агрохимической характеристики почвы $\Delta\bar{X}_{i,d}$ i-й на единицу дозы внесенного компоста:

$$\Delta\bar{X}_{i,d} = \frac{\bar{X}_{i,d} - \bar{X}_{i,0}}{d}, \quad (1)$$

где d – доза внесенного компоста, обогащенного ОСВ; i – показатель агрохимической характеристики почв; $\bar{X}_{i,0}$ – среднее значение i-го показателя агрохимической характеристики почв до внесения компоста, обогащенного ОСВ; $\bar{X}_{i,d}$ – среднее значение i-го показателя агрохимической характеристики почв после внесения дозы d компоста, обогащенного ОСВ.

Для моделирования процессов изменения характеристик почв были определены количественные характеристики законов распределения этих величин. С этой целью результаты каждого отдельного эксперимента статистически обрабатывали. Данные представлены в таблице 2. Предполагается, что выборки подчиняются нормальному закону распределения.

Чтобы имитировать изменения агрохимических характеристик был использован генератор случайных чисел с найденными параметрами. При моделировании учтены корреляционные связи между величинами $\Delta\bar{X}_i$. Коэффициенты линейных корреляций между $\Delta\bar{X}_i$ представлены в таблице 3.

Данные корреляционной матрицы свидетельствуют, что изменения агрохимических величин в разной степени связаны друг с другом. Можно выделить несколько тесно связанных групп: увеличение ΔX_1 – увеличение ΔX_3 , увеличение ΔX_2 – уменьшение ΔX_6 . Моделирование изменений агрохимических свойств почв проведено с учетом взаимосвязей этих величин [3].

2. Исходные данные и расчетные параметры законов распределения случайных величин изменения агрохимических параметров почв под воздействием компоста, обогащенного ОСВ

$\Delta\bar{X}_{1,d}$	$\Delta\bar{X}_{2,d}$	$\Delta\bar{X}_{3,d}$	$\Delta\bar{X}_{4,d}$	$\Delta\bar{X}_{5,d}$	$\Delta\bar{X}_{6,d}$
0,0945	0,0020	10,0	-2,65	0,0215	0,37
0,0580	0,0025	10,3	-3,1	0,0060	0,194
0,1310	-0,0735	9,7	-2,2	0,0370	0,546
0,1300	0,0065	24,5	1,95	0,0100	-0,22
0,0635	0,0155	24,5	-1,3	0,0350	-0,128
0,1965	-0,0040	24,4	5,2	-0,0550	-0,297
0,0770	-0,0045	10,2	-0,375	0,0228	0,1333
0,0848	-0,0103	10,6	0,1	0,0298	0,1228
0,0693	-0,0363	9,8	-0,85	0,0158	0,14475
0,0208	-0,0038	7,0	-1,5	-0,0053	-0,1353
0,0435	-0,0048	8,8	-1,00	-0,0120	-0,1593
-0,0020	-0,0035	5,2	-2,00	0,0015	-0,1718
Средние значения величин Δ_{cp}					
0,0806	-0,0095	12,9	-0,644	0,0073	0,0333
Стандартные отклонения величин σ_d					
0,05339	0,02358	7,14	2,279	0,02596	0,25924

3. Взаимосвязи между фактическими изменениями агрохимических характеристик (коэффициенты линейных корреляций k)

	$\Delta\bar{X}_1$	$\Delta\bar{X}_2$	$\Delta\bar{X}_3$	$\Delta\bar{X}_4$	$\Delta\bar{X}_5$	$\Delta\bar{X}_6$
$\Delta\bar{X}_1$	1					
$\Delta\bar{X}_2$	-0,221	1				
$\Delta\bar{X}_3$	0,656	0,351	1			
$\Delta\bar{X}_4$	0,707	0,162	0,682	1		
$\Delta\bar{X}_5$	-0,324	-0,304	-0,318	-0,698	1	
$\Delta\bar{X}_6$	0,077	-0,633	-0,445	-0,583	0,700	1

Объектом для построения имитационной модели был выбран Александровский парк ГМЗ «Царское Село». Почвенный покров парка представлен в основном дерново-подзолистыми почвами, по генезису и морфологии сходными с почвами опытного участка. Агрохимическая характеристика почв, следующая: содержание органического вещества повышенное – 3,69%, обеспеченность подвижными соединениями фосфора очень высокая и калия повышенная. Дерново-подзолистую среднесуглинистую почву Александровского парка можно отнести к нейтральной по величине обменной кислотности. Соответствуют обменной кислотности данные по гидролитической кислотности (1,4 смоль(экв)/кг) и суммы поглощенных оснований (28,5 смоль(экв)/кг). Причиной довольно высокой для почв подзолистого ряда таежно-лесной зоны суммы обменных оснований могут быть как антропогенная трансформация, так и свойства карбонатных почвообразующих пород.

Для построения имитационной модели, прогнозирующей изменения агрохимических свойств почв Александровского парка при различных дозах внесения компоста, обогащенного ОСВ, были сгенерированы данные изменений агрохимических характеристик почв на единицу дозы внесенного компоста (ΔX_i , $i = \overline{1..6}$) по нормальному закону распределения с параметрами $N_i(\Delta_{xi,cp}, \sigma_{xi,cp})$. На основе смоделированной матрицы рассчитаны показатели изменения агрохимических свойств почв Александровского парка при различных дозах внесения компоста, обогащенного ОСВ.

На основании установленных в полевом опыте закономерностей были смоделированы изменения агрохимических характеристик почв на единицу внесенного компоста, результаты моделирования приведены в таблице 4.

4. Смоделированные изменения агрохимических показателей на единицу дозы внесенного компоста, обогащенного ОСВ

$\Delta\bar{X}_{1,d}$	$\Delta\bar{X}_{2,d}$	$\Delta\bar{X}_{3,d}$	$\Delta\bar{X}_{4,d}$	$\Delta\bar{X}_{5,d}$	$\Delta\bar{X}_{6,d}$
0,102342	0,0032	12,3	-3,16	0,0239	0,3725
0,073681	-0,0049	13,5	-2,36	0,0092	0,2607
0,123475	-0,0828	11,7	-1,56	0,0451	0,5831
0,110862	0,0156	21,9	1,77	-0,020	-0,1560
0,067112	0,0160	21,6	-1,26	0,0403	-0,0205
0,198856	-0,0030	22,6	5,79	-0,0487	-0,2353
0,054986	-0,0118	12,3	-1,15	0,0162	0,1195
0,083029	0,0020	10,5	-0,88	0,0221	0,0864
0,05202	0,0320	6,6	0,14	0,0055	0,0876
0,004988	0,0032	6,9	-2,30	0,0030	-0,10228
0,039081	-0,0065	10,1	-1,77	-0,0215	-0,0968
-0,02208	-0,0092	4,3	-1,10	0,0044	-0,1548
Средние значения смоделированных величин Δ_{cp}					
0,075097	-0,0105	12,8	-0,65	0,0063	0,0547
Стандартные отклонения смоделированных величин σ_d					
0,05357	0,02437	5,73	2,197	0,02477	0,22676

Проверка гипотезы о равенстве средних величин между смоделированными и фактическими изменениями агрохимических параметров с помощью однофакторного дисперсионного анализа показала, что между ними нет достоверных различий (с вероятностью ошибки $p=0,95$). Корреляционная матрица зависимости между данными величинами, представленная в таблице 5, также доказывает, что у смоделированных и фактических величин наблюдаются аналогичные взаимосвязи.

5. Взаимосвязи между смоделированными изменениями агрохимических параметров (коэффициенты линейных корреляций k)

	$\Delta\bar{X}_1$	$\Delta\bar{X}_2$	$\Delta\bar{X}_3$	$\Delta\bar{X}_4$	$\Delta\bar{X}_5$	$\Delta\bar{X}_6$
$\Delta\bar{X}_1$	1					
$\Delta\bar{X}_2$	-0,135	1				
$\Delta\bar{X}_3$	0,743	0,343	1			
$\Delta\bar{X}_4$	0,634	0,101	0,572	1		
$\Delta\bar{X}_5$	-0,232	-0,355	-0,228	-0,698	1	
$\Delta\bar{X}_6$	0,144	-0,627	-0,205	-0,534	0,697	1

Таким образом, смоделированные величины изменений агрохимических параметров на единицу внесенного компоста, обогащенного ОСВ, могут быть использованы для прогноза изменения агрохимических характеристик почв Александровского парка.

В таблице 6 представлены фактические величины агрохимических показателей почв Александровского парка, полученные при агрохимическом обследовании и смоделированные, характеризующие прогноз изменения агрохимических свойств почв при условии внесения компоста, обогащенного ОСВ в дозах 20 и 40 т/га.

При дальнейшей обработке модельных данных использовали методику матричного анализа устойчивости математической системы согласно правилу Коши [5]. Проверка взаимосвязи и взаимозависимости диапазонов смоделированных данных с помощью корреляционного анализа показала устойчивую связь между результатами контрольных вариантов и значениями, отражающими почвенные характеристики после внесения компоста в количестве 20 и 40 т/га (табл. 7). Данная корреляционная зависимость отмечается для результатов как полевого опыта, так и опыта с почвами Александровского парка.

6. Модельные показатели агрохимической характеристики почв Александровского парка

Вариант	С _{орг.} , %	рН _{KCl}	P ₂ O ₅		K ₂ O		Hg	S
			мг/кг		смоль(экв)/кг			
1. Без компоста ОСВ (фактические)	4,89	5,74	300	137	0,80	34,1		
	3,01	5,97	197	102	0,61	42,1		
	3,66	6,21	250	110	1,46	21,0		
	3,84	6,36	300	194	1,01	25,0		
	2,64	6,60	217	257	0,60	27,2		
	4,08	6,14	227	130	0,67	21,8		
Среднее $\bar{X}_{i,0}$	3,69	6,24	256	149	1,01	28,5		
2. Компост ОСВ 20 т/га (модельные)	6,94	5,80	545	74	1,28	41,6		
	4,48	5,87	467	55	0,79	47,3		
	6,13	4,55	485	79	2,36	32,7		
	6,06	6,67	738	229	0,60	21,9		
	3,98	6,92	732	90	1,41	26,8		
	4,79	6,43	669	373	2,24	17,1		
Среднее $\bar{X}_{i,20}$	5,78	6,05	587	144	1,20	31,2		
3. Компост ОСВ 40 т/га (модельные)	8,21	5,66	719	102	1,68	37,6		
	5,09	4,69	462	108	0,83	45,6		
	3,86	6,34	525	123	1,58	16,9		
	1,76	6,23	471	71	0,78	21,0		
	8,15	5,38	802	234	1,18	19,4		
	6,14	6,10	642	101	1,78	31,7		
Среднее $\bar{X}_{i,40}$	5,52	5,79	618	108	1,14	27,6		

7. Матрица коэффициентов корреляции между значениями характеристики почвы без внесения компоста и с разными дозами внесения

Доза компоста, т/га	С _{орг.}	рН _{KCl}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Hg	S
Полевой опыт, фактические значения						
20	0,6448	0,39498	0,5095	0,2449	0,7613	0,9444
40	0,4021	0,0268	0,7169	0,9778	0,0515	0,9383
Александровский парк, прогнозируемые значения						
20	0,8018	0,4942	0,5847	0,9833	0,7668	0,8433
40	0,8501	0,6089	0,1022	0,8703	0,5177	0,9654

Тесную корреляционную зависимость при внесении разных доз компоста, как для фактических, так и для модельных величин, можно отметить только для суммы обменных оснований. Внесение в почву органических отходов, содержащих золу, вероятно, не только увеличивает содержание органического углерода, но и повышает емкость поглощения и отражается на составе почвенных катионов.

Чем выше степень насыщенности почв основаниями и больше общая емкость поглощения, тем выше буферность почвы, ее способность противостоять подкислению. Способность почвы противостоять изменению реакции почвенного раствора особенно важна для почв урбанизированных ландшафтов, подверженных химическому загрязнению и механическому нарушению. Поэтому сумма поглощенных оснований – важный показатель в ряду свойств, обеспечивающих устойчивость почв к антропогенному воздействию.

8. Результаты регрессионного анализа данных по параметру S: характеристики почвы Александровского парка без внесения компоста и с разными дозами внесения

Показатель	Коэффициент	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение
У-пересечение	0	Н/Д	Н/Д	Н/Д
Доза компоста 20 т/га	-0,20483	0,088794	-2,30675	0,036875
Доза компоста 40 т/га	1,248738	0,095983	13,01001	3,29E-09
Показатели оценки значимости уравнения регрессии				
Множественный R	0,991663			
R-квадрат	0,983395			
Нормированный R-квадрат	0,910781			
Значимость F	1,6812028646195E-12			

На основании результатов регрессионного анализа (табл. 8) было выведено уравнение регрессии для суммы обменных оснований.

$$Y = -0,20483X_1 + 1,248738X_2, \quad (2)$$

где Y – прогнозируемое значение параметра S по результатам опыта; X₁ – фактическое значение параметра S; X₂ – значение параметра «Доза компоста ОСВ», т/га.

Достоверность уравнения высокая – существенно выше 0,95 (вероятность ошибки по F-критерию Фишера также намного меньше 0,05). Значимость всех членов уравнения также высокая – превышает 0,95.

Полученное уточненное уравнение регрессии позволяет спрогнозировать изменение суммы поглощенных оснований при различных дозах внесения органических отходов в зависимости от исходного значения показателя суммы обменных оснований.

Заключение. В результате проведенного исследования выявлено, что применение органических удобрительных материалов оказало положительное влияние на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы, достоверно увеличивая содержание органического углерода и запасы доступного фосфора в почве. Можно отметить повышение гидролитической кислотности в виде тенденции при максимальной дозе органического компоста при общем увеличении емкости катионного обмена. Выявленные в полевых исследованиях зависимости были использованы для прогноза изменений агрохимических свойств почв Александровского парка, при возможном применении органического компоста, обогащенного ОСВ. Корреляционный анализ эмпирических и прогнозируемых результатов показал тесную прямую зависимость между внесением в почву органического материала и изменением суммы поглощенных катионов. Полученное на основе анализа опытных данных уравнение регрессии ($Y = -0,20483X_1 + 1,248738X_2$) с достаточно высоким уровнем достоверности (не менее 0,95) позволяет количественно оценить степень влияния дозы органических отходов и исходной величины суммы обменных оснований на изменение суммы обменных оснований смоделированного объекта.

Литература

1. Баженов, В.И., Королева Е.А., Соколова К.Н. Имитационное моделирование очистки сточных вод АПК // Научные основы производства и обеспечения качества биологических препаратов для АПК. Щелково: ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт биологической промышленности, 2019. – С. 450-460.
2. Василенков С.В. Моделирование процесса выноса цезия-137 с продуктами водной эрозии почв // Мелиорация и водное хозяйство. – 2011. – № 5. – С. 15-17.
3. Галанина О.В., Голубев А.М. Моделирование выборок с заданными свойствами методом Монте-Карло для обучения и исследования нейронных сетей прямого распространения // Мягкие измерения и вычисления. – М. – 2023. – Т. 70. – № 9-1. – С. 21-27.
4. Ельшаева, И. В. Влияние осадка сточных вод на агрохимическую характеристику дерново-подзолистой почвы и урожайность трав / И. В. Ельшаева, В. И. Титова, А. С. Пинаева // Плодородие. – 2024. – № 1. – С. 71-74.
5. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Максимов А.Н., Белова Н.Н., Огнев О.Г. К вопросу о решении задачи теории устойчивости для системы управления трактором // Известия Международной академии аграрного образования. – 2022. – № 63. – С. 21-24.
6. Погоньшиев В.А., Погоньшиева Д.А. О совершенствовании управления АПК региона на основе контроллинга // Новые информационные технологии в образовании и аграрном секторе экономики. Брянский государственный аграрный университет, 2019. – С. 63-67.
7. Салугин А.Н. Имитационное моделирование деградации пастбищных экосистем аридной зоны // Российская сельскохозяйственная наука. – 2023. – № 2. – С. 7-10.
8. Тютюников А.А. Моделирование развития внутреннего рынка свинины до 2030 г. // Новые векторы развития АПК и сельских территорий: материалы национальной научно-практической конференции, посвященной 90-летию института. – Воронеж, 2021. – С. 31-38.
9. Экспериментальная оценка значений параметров переноса агрохимикатов в почве: шаг смещения / Е.В. Шеин, А.А. Кокорева, В.Н. Колупаева [и др.] // Агрохимический вестник. – 2016. – № 6. – С. 20-23.
10. Худякова Е.В., Липатов А.А. Имитационное моделирование процессов и систем в АПК. – М: ИКЦ «Колос-с», 2021. – 256 с.
11. ТУ 39.0–007–50872745–2019 Технические условия на продукт производственно-технического назначения на основе осадка сточных вод для рекультивации нарушенных земель.

AN IMITATION MODEL FOR PREDICTING CHANGES IN SOIL AGROCHEMICAL CHARACTERISTICS WHEN USING COMPOST ENRICHED WITH WASTEWATER SLUDGE

Irina Vladimirovna Elshaeva,
PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor
Saint Petersburg State Agrarian University,
Petersburgskoe Shosse, 2, Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russia, elshaevaiv@mail.ru,
Oleg Gennadievich Ognev, D.Sc. (Engineering), Professor,
Saint Petersburg State Agrarian University,
Petersburgskoe Shosse, 2, Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russia, ognew.og@mail.ru.

*To maintain the ecological sustainability of anthropogenically transformed landscapes, it is necessary to pay attention first of all to the health and fertility of soils exposed to intensive technogenic loads. The priority here should be the systems of using organic fertilizers or fertilizers from organic raw materials. In this paper, the effect of compost based on sewage sludge of municipal treatment facilities on the agrochemical characteristics of sod-podzolic soil was studied. In a long-term field experiment, the content of organic matter and available phosphorus in the soil increased, with a general increase in the cation exchange capacity. The data obtained in the field experiment allowed us to create a mathematical model predicting the content of organic matter, nutrients and oxidation-reduction properties of the soil after a single application of compost enriched with sewage sludge. Correlation analysis of the empirical and predicted results showed a close direct relationship between the introduction of organic material into the soil and the change in the sum of absorbed cations. The regression equation ($Y = -0.20483 * X1 + 1.248738 * X2$) with a sufficiently high level of reliability (at least 0.95) allows us to quantitatively assess the degree of influence of organic waste on the change in the value of the sum of exchangeable bases of the modeled object.*

Key words: sewage sludge, agrochemical soil parameters, simulation model, regression analysis.